



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **106174** (13) **C2**  
(51) МПК  
**G05F 1/70** (2006.01)

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

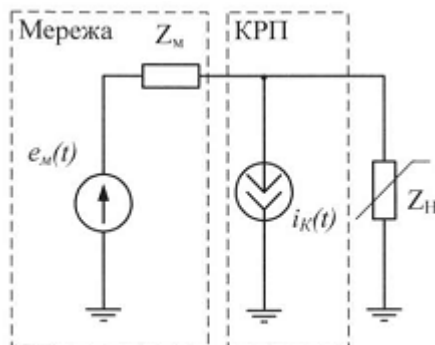
<p>(21) Номер заявки: <b>а 2013 10824</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>09.09.2013</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: <b>25.07.2014</b></p> <p>(41) Публікація відомостей про заявку: <b>10.02.2014, Бюл.№ 3</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>25.07.2014, Бюл.№ 14</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Бурлака Володимир Володимирович (UA), Гулаков Сергій Володимирович (UA), Поднебенна Світлана Костянтинівна (UA)</b></p> <p>(73) Власник(и): <b>ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД "ПРИАЗОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ", вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, Донецька обл., 87500 (UA)</b></p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: Dixon J., Reactive Power compensation Technologies: State-of-the-Art Review / J. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez, R. Domke // IEEE Proc. - December, 2005. - pp. 2144-2164 J. W. Dixon, Y. del Valle, M. Orchard, M. Ortuzar, L. Moran and C Maffrand, "A Full Compensating System for General Loads, Based on a Combination of Thyristor Binary Compensator, and a PWM-IGBT Active Power Filter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 50, № 5, October 2003, pp. 982-989 US 6876179 B2, 05.04.2005 US 2004090212 A1; 13.05.2004 US 2004155633 A1; 12.08.2004 US 2004090214 A1; 13.05.2004 JPS 6194124 A; 13.05.1986 Анализ систем компенсации реактивной мощности в условиях автономных генераторных установок / Зачепа Ю.В., Василькова Т.С. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. - 2010 - №4/2010(12) – С. 71-77 Исследование эффективности реализации пилотного проекта по установке статистического тиристорного компенсатора на подстанции Ново-Анжерская 500 КВ / Мастерова О.А., Тюлькин М.В. // Известия Томского политехнического университета, 2010 - Т.317. № 4 – С 100- 103</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

UA 106174 C2

## (54) СПОСІБ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

(57) Реферат:

Винахід належить до електротехніки і може бути використаний для компенсації та регулювання реактивної потужності та підвищення якості електроенергії розподільних мереж. Запропоновано спосіб встановлення співвідношення ємностей ступенів батареї конденсаторів (БК) у складі компенсатора реактивної потужності, який складається з послідовно з'єднаної БК і активного компенсатора (активного фільтра). Застосування запропонованого способу компенсації реактивної потужності дозволяє підвищити економічність компенсатора реактивної потужності за рахунок зменшення кількості конденсаторів в БК та забезпечити плавне (безперервне) регулювання реактивної потужності.



Фіг. 2

Винахід належить до електротехніки і може бути використаний для компенсації та регулювання реактивної потужності та підвищення якості електроенергії розподільчих мереж.

Сучасним рішенням компенсації реактивної потужності є використання компенсаторів реактивної потужності (КРП) зі ступеневим перемиканням, статичних компенсаторів (STATCOM) або активних фільтрів (АФ).

Відомий спосіб компенсації реактивної потужності (Dixon J., Reactive Power compensation Technologies: State-of-the-Art Review / J. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez, R. Domke // IEEE Proc. - December, 2005. - pp. 2144-2164), який полягає у підключенні паралельно навантаженню батареї конденсаторів, що перемикаються. Відмінними ознаками способу є ступінчасте управління, швидкість регулювання до одного періоду напруги мережі, відсутність генерації вищих гармонік до мережі. Недоліками способу є відсутність плавного регулювання ємності батареї конденсаторів та, при наявності в напрузі мережі вищих гармонік, можливість резонансних перевантажень конденсаторів КРП, що призводить до виходу них з ладу.

Відомий спосіб компенсації реактивної потужності (Dixon J., Reactive Power compensation Technologies: State-of-the-Art Review / J. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez, R. Domke // IEEE Proc. - December, 2005. - pp. 2144-2164), який полягає у підключенні паралельно батареї конденсаторів, що перемикаються, реактору, регулювання якого відбувається за допомогою тиристорів, чим досягається плавне регулювання реактивної потужності КРП. Перевагами такого способу компенсації реактивної потужності є можливість безперервного регулювання і його висока швидкість - не більше половини періоду напруги мережі, швидке протікання перехідних процесів. Недоліки способу полягають у генерації струмів вищих гармонік тиристорно-регульованими реакторами та підвищенні втрати активної потужності в КРП.

Відомий спосіб компенсації реактивної потужності, згідно з яким ємності ступенів батареї конденсаторів встановлюють пропорційно цілим ступеням двійки (J. W. Dixon, Y. del Valle, M. Orchard, M. Ortuzar, L. Moran and C. Maffrand, "A Full Compensating System for General Loads, Based on a Combination of Thyristor Binary Compensator, and a PWM-IGBT Active Power Filter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 50, № 5, October 2003, pp. 982-989). При цьому, маючи  $m$  паралельно включених конденсаторів у батареї, можна отримати  $2^m$  ступенів регулювання реактивної потужності. Так, маючи чотири конденсатори з реактивними потужностями 1, 2, 4 та 8 кВАр, можна отримати 16 ступенів регулювання - від 0 до 15 кВАр з дискретністю 1 кВАр. До недоліків способу належить те, що при малих номерах ступенів з'являються розриви у регульовальній характеристиці КРП, що веде до погіршення точності компенсації реактивної потужності.

Відомий спосіб компенсації реактивної потужності (Hybrid Reactive Power Compensation Device / Hurng-Liang Chou, Chin-Chang Wu, Wen-Pin Hsu, Yao-Jen Chang // United States Patent US 6,876,179 B2, Apr. 5, 2005) шляхом підключення паралельно навантаженню з'єднаних між собою активного компенсатора і батареї конденсаторів, що перемикаються. Таке рішення дозволяє позбутися генерації вищих гармонік до мережі живлення, забезпечити плавне регулювання потужності КРП та усунути можливість резонансів батареї конденсаторів з мережею. Спосіб прийнято за прототип.

Недолік способу - малий діапазон безперервного регулювання потужності КРП, з-за чого регульовальна характеристика може мати розриви, що призводить до зменшення точності компенсації реактивної потужності. Усунення розривів веде до необхідності збільшення встановленої потужності активного компенсатора або до підвищення кількості ступенів батареї конденсаторів, що погіршує техніко-економічні показники способу.

В основу винаходу поставлена задача удосконалити спосіб компенсації реактивної потужності, що дозволить забезпечити безперервне регулювання реактивної потужності при переключенні ступенів батареї конденсаторів, тим самим підвищити точність компенсації реактивної потужності при незмінній встановленій потужності активного компенсатора та підвищити економічність компенсатора реактивної потужності за рахунок зменшення кількості конденсаторів у складі батареї.

Для рішення поставленої задачі в способі компенсації реактивної потужності, що включає підключення паралельно навантаженню з'єднаних між собою активного компенсатора і батареї конденсаторів, що перемикаються, та встановлення струму активного компенсатора рівним реактивній компоненті першої гармоніки струму навантаження зі зворотним знаком, відповідно до винаходу, співвідношення ємностей сусідніх ступенів батареї конденсаторів, що перемикаються, встановлюють згідно виразу 
$$\frac{C_{n+1}}{C_n} = \frac{U+E}{U-E}$$
, де  $C_{n+1}$  - ємність ступеня з номером

$(n+1)$ ,  $C_n$  - ємність ступеня з номером  $n$ ,  $E$  - максимальна вихідна напруга активного компенсатора на основній частоті,  $U$  - складова напруги мережі на основній частоті.

Запропоновані технічні рішення пояснюються кресленнями, де на Фіг. 1 показана схема заміщення КРП, на Фіг. 2 - спрощена схема заміщення КРП, на Фіг. 3 - регулювальна характеристика КРП з батареєю конденсаторів, ємності ступенів якої встановлені пропорційно цілим ступеням двійки, на Фіг. 4 - регулювальна характеристика КРП з батареєю конденсаторів, ємності ступенів якої встановлені відповідно до винаходу, Фіг. 5 - схема підключення КРП, в якому кількість конденсаторів та тиристорних ключів пасивного компенсатора дорівнює 10, згідно з першим варіантом способу компенсації реактивної потужності.

ЕРС активного компенсатора  $e(t)$  формується системою керування КРП таким чином, що КРП відносно до мережі являє собою джерело струму  $i_k(t)$ , в спектрі якого присутня лише основна частота мережі. Виходячи з цього, подальший аналіз виконано лише по основній частоті.

Нехтуючи втратами активної потужності в КРП, можна вважати, що струм КРП носить чисто реактивний характер, тому далі можна оперувати модулями (середньоквадратичними значеннями) напруги та струму.

Мережевий струм КРП дорівнює

$$I_k = \frac{U - E}{X_C} E$$

де  $X_C$  - опір батареї конденсаторів, Ом;

$U$  - складова напруги мережі на основній частоті, В;

$E$  - складова ЕРС активного компенсатора на основній частоті мережі, В.

Регулювання потужності КРП виконується за рахунок дискретної зміни  $X_C$  перемиканням батареї конденсаторів та плавного регулювання  $E$ .

Величина реактивної потужності, що генерується КРП, з урахуванням попереднього виразу, визначається як

$$Q = I_k \cdot (U_c + E) = \frac{U - E}{X_C} \cdot (U_c + E),$$

де  $U_c$  - складова напруги на конденсаторах на основній частоті, В.

З урахуванням того, що  $U = U_c + E$ , останній вираз можна представити у вигляді:

$$Q = \frac{U - E}{X_C} \cdot U.$$

ЕРС активного компенсатора встановлюється згідно виразу:

$$E = \Delta \cdot U,$$

де  $\Delta$  - коефіцієнт пропорційності між напругою мережі та ЕРС активного компенсатора.

З урахуванням останнього, реактивна потужність  $n$ -го ступеня обчислюється таким чином:

$$Q_n = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_n \cdot U^2 \cdot (1 - \Delta).$$

Коефіцієнт  $\Delta$  може приймати значення в діапазоні  $[-\Delta_{\max} \dots 0 \dots +\Delta_{\max}]$ ,

причому максимальна реактивна потужність  $n$ -го ступеня забезпечується при від'ємному значенні коефіцієнта  $\Delta$ , а мінімальна реактивна потужність  $(n+1)$ -го ступеня - при позитивному значенні коефіцієнта  $\Delta$ . Від'ємний знак коефіцієнта  $\Delta$  вказує на зміну фази ЕРС активного компенсатора на 180 електричних градусів відносно до мережевої напруги  $U$ .

Для забезпечення плавного регулювання реактивної потужності потрібно виконання умови:

$$Q_{n\max} = Q_{(n+1)\min}.$$

Максимальна реактивна потужність  $n$ -го ступеня дорівнює:

$$Q_{n\max} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_n \cdot U^2 \cdot (1 + \Delta_{\max}).$$

Мінімальна реактивна потужність  $(n+1)$  - го ступеня дорівнює:

$$Q_{(n+1)\min} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{n+1} \cdot U^2 \cdot (1 - \Delta_{\max}).$$

З останніх виразів отримано співвідношення між ємностями ступенів, завдяки якому забезпечується безперервне регулювання:

$$\frac{C_{n+1}}{C_n} = \frac{U + E}{U - E}.$$

Видно, що отриманий вираз являє собою геометричну прогресію  $\frac{U + E}{U - E}$ .

Окремого розгляду потребує питання технічної реалізації батареї конденсаторів, що перемикаються.

Очевидним є вибір кількості конденсаторів рівним необхідній кількості ступенів перемикавання. Проте це призводить до погіршення техніко-економічних показників КРП через велику кількість конденсаторів та ускладнення засобів керування їхньою комутацією.

При існуючих способах зменшення кількості конденсаторів при малих номерах ступенів не завжди виконується умова  $Q_{n\max} = Q_{(n+1)\min}$ , що веде до розривів у регульовальній характеристиці КРП, що проявляється в появі ненульового  $\Delta Q$  (Фіг. 3). Коли ємності ступенів батареї конденсаторів встановлюють пропорційно цілим ступеням двійки, характер розподілу реактивної потужності між ступенями буде мати вигляд, наведений на Фіг. 3.

Приклад реалізації способу.

Спосіб здійснюється наступним чином. Батарея конденсаторів має 10 конденсаторів (Фіг. 5) з ємностями відповідно 150 мкФ, 33 мкФ, 40 мкФ, 50 мкФ, 60 мкФ, 73 мкФ, 90 мкФ, 109 мкФ, 133 мкФ, 162 мкФ. Шляхом підключення конденсаторів в паралель за допомогою зустрічно-паралельно включених тиристорів отримано десять ступенів безперервного регулювання потужності КРП (табл. 2). Діапазон потужності КРП становить від 2,1 кВАр до 13,8 кВАр при напрузі мережі 220 В і максимальній вихідній напрузі активного компенсатора 10 % від мережевої, тобто 22 В.

Таблица 2

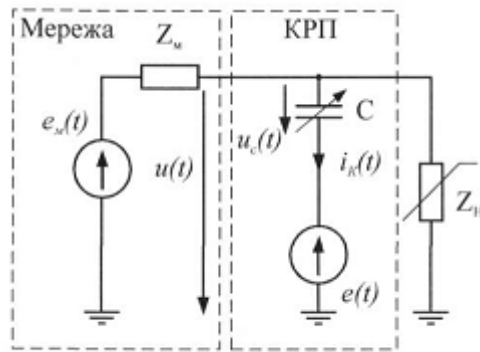
Конденсатор	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Ємність, мкФ	150	33	40	50	60	73	90	109	133	162
Номер ступеня батареї конденсаторів	Включені конденсатори (+)									
1	+									
2	+	+								
3	+	+	+							
4	+	+	+	+						
5	+	+	+	+	+					
6	+	+	+	+	+	+				
7	+	+	+	+	+	+	+			
8	+	+	+	+	+	+	+	+		
9	+	+	+	+		+	+	+	+	
10	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Застосування запропонованого способу компенсації реактивної потужності дозволяє підвищити економічність компенсатора реактивної потужності за рахунок зменшення кількості конденсаторів у складі батареї та забезпечити плавне (безперервне) регулювання реактивної потужності.

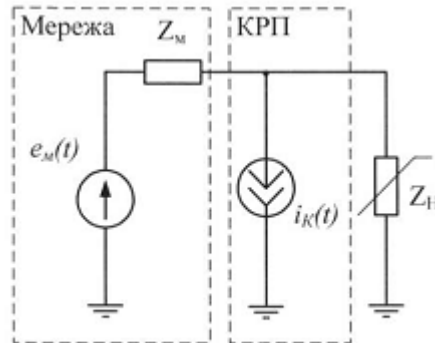
#### ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Спосіб компенсації реактивної потужності, що включає підключення паралельно навантаженню з'єднаних між собою активного компенсатора і батареї конденсаторів, що перемикаються, та встановлення струму активного компенсатора рівним реактивній компоненті першої гармоніки струму навантаження зі зворотним знаком, який **відрізняється** тим, що співвідношення ємностей сусідніх ступенів батареї конденсаторів, що перемикаються, встановлюють згідно з виразом  $\frac{C_{n+1}}{C_n} = \frac{U+E}{U-E}$ , де  $C_{n+1}$  - ємність ступеня з номером (n+1),  $C_n$  - ємність ступеня з

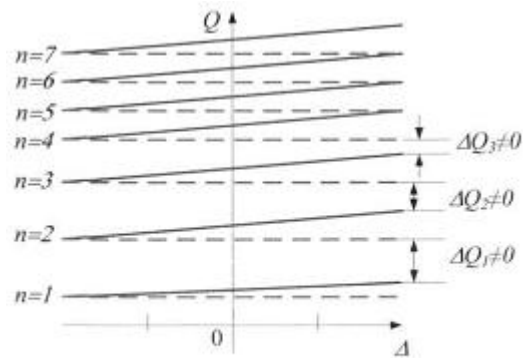
номером n, E - максимальна вихідна напруга активного компенсатора на основній частоті, U - складова напруги мережі на основній частоті.



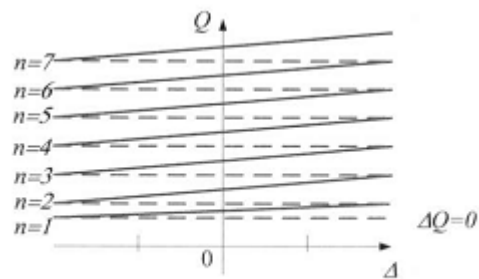
Фиг. 1



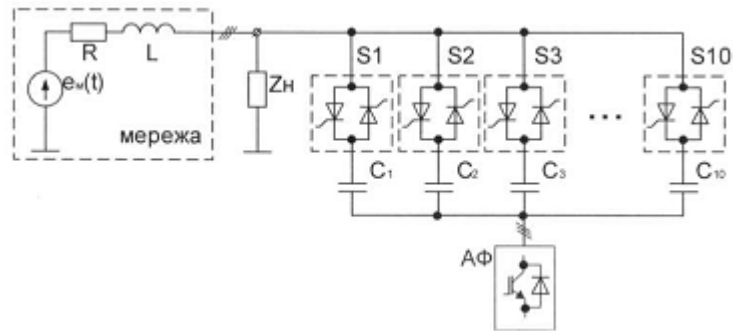
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

Комп'ютерна верстка О. Рябко

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601